

东营凹陷热流体活动及其对水-岩相互作用的影响

曾溅辉

(石油大学盆地与油藏研究中心,北京 102200)

摘要: 从气体地球化学、有机质热变、包裹体均一温度、古地温梯度、成岩矿物、重金属元素和岩浆活动等方面证实了东营凹陷发生了大量的热流体活动. 热流体主要沿活动性较强的深大断裂运移至浅部,并以侧向强迫对流为主,同时具有多期次活动的特点. 热流体通过改变温度场和地温梯度以及带入一些无机物质,导致水-岩相互作用强度和类型的差异.

关键词: 热流体活动;水/岩相互作用;东营凹陷.

中图分类号: P618.130.2;P314

文献标识码: A

文章编号: 1000-2383(2000)02-0133-04

作者简介: 曾溅辉,男,副教授,1962年生,1994年毕业于中国地质科学院,获博士学位,现主要从事盆地流体分析、油气运移和聚集以及水/岩相互作用教学和研究工作.

1 沉积盆地热流体的含义

沉积盆地中的热流体,特别是含烃热流体的活动,不仅对盆地的温度场、压力场和化学场产生重要的影响,而且对盆地中的水/岩相互作用和油气的生成、运移和聚集以及某些层控矿床的形成具有重要的作用. 近十几年来,盆地热流体活动与地质作用研究已成为国内外地学界的研究热点,并取得了大量的研究成果.

目前,对沉积盆地热流体的含义还没有一个统一和明确的认识. 大多数学者认为热流体是指温度和压力低于水临界点的流体,但在一些文献中将超临界流体也包括在热流体范畴之内^[1]. 一些人认为热流体主要指来自深部的流体,主要包括深部壳源的变质水、幔源的岩浆水及其他流体,如烃气、 H_2 、 CO_2 ,以及无机氦气等. 孙永传等^[2]、陈红汉等^[3]、龚再升等^[4]认为凡温度高于 $75\sim 80\text{ }^\circ\text{C}$ 且具有一定化学活性的地下流体均可称为热流体. 它包括两层含义:一是所谓“热”,即温度高于表生大气水,且又具有与地表水不同化学活性的流体,诸如粘土矿物脱水,来源于上地壳变质水或地幔的岩浆水及其

他流体如烃气、 H_2 、 CO_2 等;二是将温度下限定义为 $75\sim 80\text{ }^\circ\text{C}$,恰好与粘土矿物蒙皂石第一脱水带的起始温度和干酪根热解释放出有机酸起作用的最低温度一致. 该热流体含义将热流体与研究的问题有机地结合起来,可操作性较强. 但是我们认为:(1) $75\sim 80\text{ }^\circ\text{C}$ 的温度仅为热流体的下限温度;(2)“热”是一个相对的概念. 若我们所研究的流体的温度达到 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 时,那么只有温度大于 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 的流体才能称之为热流体.

2 东营凹陷热流体活动的证据

东营凹陷属于渤海湾裂谷盆地济阳拗陷内的一个次级构造单元,为一北断南超、西陡东缓的中新生代断陷盆地,其基底为古生界地台沉积. 东营凹陷在新生代经历了两个大的发展演化阶段. 老第三纪为断拗阶段,该阶段东营凹陷断裂活动加强,盆地加速陷落、扩大,一侧断陷,另一侧超覆或尖灭,并发展成为单断式的、统一的断拗盆地;新第三纪为拗陷阶段,由于受喜马拉雅运动第三幕的影响,该阶段断裂活动减弱,整个渤海湾地区进入拗陷期. 拗陷内新生代发育齐全,包括下第三系、上第三系和第四系. 下第三系是本凹陷最主要含油气层系和最主要的生油层系,上第三系和前第三系是次要的含油层系. 由于东营凹陷上述构造和沉积特点,导致其热流体活动

收稿日期: 1999-07-07

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(No. G1999043309); 中国石油天然气集团公司“九五”重点科技攻关项目(No. 960007).



图 1 郝科 1 井镜质体反射率随井深变化

Fig.1 Changes of R_o with the depth in Haoke No.1 well

比较强烈,主要证据有:

(1)气体地球化学异常.气体地球化学研究表明,东营凹陷有十余个 He 异常.有些异常比地壳 He 平均丰度高出好几个数量级,其中幔源 He 达 20%~40%.另外沿高青—平南断裂分布有七八个 CO_2 气藏,如平方王、平南、青城和花沟等,现已确定主要为无机成因,来源于深部^[5,6].

(2)有机质异常热变.东营凹陷郝科 1 井井深 3 200~5 800 m 的沙河街组第四段泥岩和孔店组泥岩中的镜质体反射率一般随深度增加而增大,但在埋深 3 900 m 左右, R_o 由约 0.7% 骤增至约 1.6%, 然后至 5 200 m 又落在区域变化线上(图 1). 东营凹陷其他地区也出现类似的情况.

(3)包裹体均一温度和古地温梯度异常.根据郝科 1 井矿物包裹体均一温度数据,从埋深 3 709.30~5 474.75 m. 包裹体的均一温度和压力校正温度均随深度增加而增大.将郝科 1 井 3 700 m 以下的包裹体均一温度校正值与东营凹陷 1 700~3 300 m 实测井温数据一同绘于图 2 可以看出,包裹体温度和实测井温基本位于同一直线上,但是在井深 3 800~4 800 m 之间,出现一高温包,该高温包很可能是深部热流体作用所致.

东营凹陷第三系流体包裹体均一温度测定结果表明,同一口井或同一地区在同一埋藏深度或埋藏深度相差不大的地层中,均一温度相差较大.例如坨 76 井埋深 2 898 m 处的沙三段中砂岩 SiO_2 胶结物流体包裹体的均一化温度变化范围很大,出现 110℃, 140℃, 158℃, 165℃, 170℃ 和 173℃ 几组不同的温度.这种现象在牛 14 井、牛 21 井、牛 24 井、坨 71 井和坨 74-1 井等许多钻井中出现,这很可能是由于热流体活动的影响.



图 2 东营凹陷实测温度与郝科 1 井包裹体均一温度比较

Fig.2 Comparison of measured temperatures in Dongying sag with homogeneous temperatures of fluid inclusions in Haoke No.1 well

(4)成岩矿物异常.东营凹陷南斜坡草桥和金家一带,沙二至沙四段泥岩和砂岩层埋藏深度浅,大多在 1 000 m 左右, R_o 值低(0.28%~0.35%),处于早成岩作用阶段的 A 或 B 期,但出现晚成岩阶段 A 期的成岩现象,例如粘土矿物中伊利石的含量达 20%~45%, I/S 混层矿物中蒙脱石占 60%~90%,另外在小于 1 300 m,最浅 928 m 的储层出现铁方解石,其含量大于 10%,最高达 32.5%.由于草桥和金家自沙河街组沉积以来一直位于凹陷的边缘,沉积和抬升幅度一般均不超过 1 000 m.结合该区的断裂和岩浆活动,可以认为草桥和金家一带成岩史与埋藏史之间存在的矛盾是由于热流体的作用.

(5)重金属元素异常.在东营凹陷的一些油田水、原油及下第三系泥岩和砂岩中发现 Au, Cu, Pb 和 Zn 等金属元素异常富集,其质量分数明显超过基性、中性及酸性岩浆岩各自的平均值,有的已达到开采利用的工业品位(表 1).这些金属元素很可能是深部流体带上的^[7].

(6)岩浆活动.东营凹陷南部和西部沿主要断裂广泛分布着第三纪火成岩,这些岩浆活动一方面对地温场构成影响,另一方面将导致深部热流体沿多期活动的张性正断裂上升至浅部.

3 东营凹陷热流体活动特征

根据东营凹陷温压场和化学场特征,本区热流

表 1 东营凹陷泥岩/砂岩微量元素质量分数与主要岩类对比

Table 1 Comparison of mass fractions of some minor elements in some magmatites and shale stones with those in sandstones and mudstones in Dongying sag 10⁻⁶

岩性	Zn	Co	Ni	V	Cu	Pb	
泥岩	分布范围	6~491	10~81	5~326	83.8~540	24~196	21~67
	平均值	84.37	23	50.03	305	6.1	42.9
	样品数	296	296	296	10	52	30
砂岩	分布范围	16.2~466	4.2~32	7.4~70	5.9~63.6	50~50	57~57
	平均值	121.9	10.82	30.8	37.8	50	57
	样品数	43	43	43	31	4	4
玄武岩*	105	48	130	250	87	6	
闪长岩*	72	10	55	100	35	15	
花岗岩*	60	1	8	0	20	20	
页岩(世界平均值)*	95	19	68	130	45	20	
琉球岛弧海底火山热液沉积*	515	72	600		134	35	

* 转引自张义纲等^[8].



图 3 平方王 CO₂ 油气藏热流体活动示意(剖面图引自帅德福等^[5])

Fig. 3 Sketch of thermal fluid flow of CO₂-bearing oil-gas reservoir in Pingfangwang

1. 闪长玢岩; 2. 辉绿岩; 3. 结晶基底; 4. 页岩; 5. 灰岩; 6. 含烃热流体运移方向; 7. 幔源和岩浆成因含 CO₂ 热流体运移方向; 8. 变质成因含 CO₂ 热流体运移方向; 9. CO₂ 气层; 10. 油气层

体活动主要表现为下列特征:(1)热流体以侧向强迫对流运动为主,垂向运动比较弱。例如,在平方王 CO₂ 油气藏,热流体以侧向强迫对流运动为主。一方面来自幔源和岩浆成因含 CO₂ 热流体沿活动断裂上升,侧向运移进入油气藏,另一方面来自利津洼陷的含烃热流体亦沿断层和输导层侧向运移,进入油气藏。只有少部分变质成因的 CO₂ 热流体沿辉绿岩侵入体穿过寒武系页岩垂向进入油气藏(图 3)。

(2)热流体运移的主要通道为活动性较强的深大断裂,尤其是几组断裂的交会地带。例如在中央隆起带和北部斜坡带的胜坨、东辛等地区,即弧形断裂

和近 EN 向断裂交会处,古地温梯度较高,平均达 4.82~5.34 °C/100 m,局部高达 8.62 °C/100 m,说明该构造交会带为深部热流体运移的主要通道。

(3)热流体活动具有多期次的特点。根据包裹体均一温度统计直方图可以发现,本区许多地区发生了多期热流体活动。例如在胜坨和牛庄洼陷一带,出现了 3 期热流体活动,温度分别为 90~110 °C, 140~160 °C 和 170~180 °C,其中温度为 140~160 °C 的热流体活动最为强烈,在许多井中都发现这组温度的流体包裹体。

4 热流体活动对水/岩相互作用的影响

热流体活动对水/岩相互作用的影响主要包括两个方面。当高温热流体上涌,第一效应是改变了原来的热传导温度场,在原先热传导型温度场之上叠加了侧向(或垂向)强迫热对流(forced convection)温度场,导致侧向或垂向热对流活跃,地温梯度增高。第二效应是高温热流体将一些无机物质带入砂岩层和泥岩层。这两个效应将对砂岩层和泥岩层中的流体-岩石相互作用构成重要的影响。

在平方王油气田,首先由于高温热流体的上涌,改变了原来的热传导温度场,地温梯度高达 $4.6\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$,浅层蒙脱石提前进入脱水带,并缺失 I/S 混层 R_1 带。受地温影响较大的一些水/岩相互作用在浅部出现,并形成相应的次生矿物。例如强石英次生加大出现在平方王地区埋深 $1\ 500\text{ m}$ 处,比胜坨油田某些井出现的最浅深度浅 600 m 之多,为东营凹陷出现的最浅深度。同时这种热流体活动也使浅层潜在烃源岩受热流体烘烤,部分进入成熟窗,从而导致在深部发生的一些有机/无机相互作用在浅部出现。其次,随着热流体的上涌,使一些高温无机物质,尤其是无机 CO_2 流体进入浅部砂岩层,使 E_{s4} 上部储集层——礁灰岩和部分碳酸盐胶结物溶解,导致次生溶孔十分发育,孔隙度可高达 $35\% \sim 42\%$ 。根据该区地层水化学分析结果,地层水中有机酸含量不大,因此造成储层溶蚀的溶剂主要是 CO_2 和碳酸。另外,高温 CO_2 与铝硅酸盐发生热液变质作用,生成片钠铝石矿物($\text{NaAlCO}_3(\text{OH})_2$)。这种矿物仅发现于平方王油田沙四段 CO_2 气顶油藏的砂岩中。它在砂岩中有两种产状:一是呈放射状集合体充填孔隙;二是以纤维状和毛发状等集合体交代陆源碎屑、同生泥屑和粘土杂基及先期形成的成岩矿物方解石、白云石、自生高岭石等,形成时间最晚。大量富 CO_2 的酸性溶液进入储层,还使部分长石发生地下风化,形成大量蠕虫状和书页状高岭石等。另外在东营凹陷东辛、草桥、羊角沟等油田的水/岩相互作用也受热流体活动的影响,例如这些油田的浅层气为生物-热成因混合气,浅部成岩矿物异常等,只不过影响程度相对平方王油田小一些。

热流体活动还对泥岩和砂岩层中微量元素的含量构成重要影响。从表 1 可知,东营凹陷一些泥岩和

砂岩中的 Cu, Zn, Co, Ni 和 V 等微量元素呈现很高的异常,一般均高于页岩的世界平均值,一些火成岩的含量甚至比海底热液沉积物还高。不过各种微量元素的分布范围较大,反映了凹陷内的不均一性。泥岩和砂岩微量元素平均质量分数的异常,指示了沙河街组沉积时和沉积后,热液长期侵入东营凹陷湖盆,犹如东非的现代裂谷湖泊基伍湖^[8]。这些微量元素的加入,导致凹陷泥岩和砂岩层流体-岩石相互作用的复杂性。

5 结论

东营凹陷发生了大量的热流体活动,并在气体地球化学、有机质热变、包裹体均一温度、古地温梯度、成岩矿物、重金属元素和岩浆活动留下了证据。热流体以侧向强迫对流运动为主,垂向运动较弱,活动性较强的深大断裂和热流体运移的主要通道,同时热流体具有多期次活动的特点。热流体对水-岩相互作用的影响主要表现在两个方面:一方面改变了原来的热传导温度场,产生地温梯度很高的热传导与热对流相叠加的温度场;另一方面是高温热流体将一些无机物质带入,其结果将导致水-岩相互作用强度和类型的差异。

石油大学(北京)邱楠生博士和胜利油田地质研究院郑和荣副院长和蔡进功副总地质师等提供了有关分析资料,对此表示衷心感谢。

参考文献:

- [1] 曾贻善. 热水溶液地球化学[J]. 地学前缘, 1996, 3(3): 89~95.
- [2] 孙永传, 陈红汉, 李蕙生, 等. 莺-琼盆地 YAB-1 气田热流体活动与有机/无机成岩响应[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1995, 20(3): 276~282.
- [3] 陈红汉, 李思田. 活动热流体与成藏、成矿动力学研究进展[J]. 地学前缘, 1996, 3(4): 259~262.
- [4] 龚再升, 李思田, 谢泰俊, 等. 南海北部大陆边缘盆地分析与油气聚集[M]. 北京: 科学出版社, 1997. 222~256.
- [5] 帅德福, 王秉海. 中国石油地质志(卷六): 胜利油田[M]. 北京: 石油工业出版社, 1993. 325~330.
- [6] 郑乐平. 非烃类气体(CO_2 、He)生成运移聚集的综合模型——以济阳拗陷 CO_2 气藏为例[D]. 南京: 南京大学地球科学系, 1996.